系统学是什么

郭雷　中国科学院数学与系统科学研究院

系统是自然界和人类社会中一切事物存在的基本方式，各式各样的系统组成了我们所在的世界。一个系统是由相互关联和相互作用的多个元素（或子系统）所组成的具有特定功能的有机整体，这个系统又可作为子系统成为更大系统的组成部分。现代科学在从基本粒子到宇宙的不同时空尺度上研究各类具体系统的结构与功能关系，逐渐形成了自然科学与社会科学的各门具体科学。系统科学的研究对象是“系统”自身，其目的是探索各类系统的结构、环境与功能的普适关系以及演化与调控的一般规律。

我国系统科学的主要开创者和推动者钱学森曾提出系统科学体系的层次划分（系统论、系统学、系统技术科学、系统工程技术），并认为系统论是系统科学的哲学层次，而系统学（systematology）是系统科学的基础理论[1]。由此可见，系统学应是科学中的科学，基础中的基础。尽管如此，系统学目前似乎未被广泛认识，其自身也存在需要进一步探讨和明确的问题，这促使笔者思考并尝试在此给出阶段性认识。

1. 系统学的内涵

首先，系统学是一门什么性质的科学？传统的学科分类，通常是以现实世界中的具体研究对象为划分依据，而系统学则试图探索各类系统的普适规律。因此，严格说来，它不在以还原论思维为主导的学科分类视野中。这一点类似数学（主要研究量的关系与空间形式），两者都是横断科学，但这两门科学的侧重点各不相同。钱学森把系统科学与数学科学、自然科学、社会科学、思维科学等并列为科学技术门类之一[1]，是颇有洞见性的。

其次，系统学的内涵是什么？它的内涵体现在系统科学的定义之中，关键是各类不同系统是否存在普适性共同规律。答案是肯定的。从中国古代“阴阳学说”、“中庸之道”、“天人合一”、“和而不同”、“奇正之术”等丰富的系统思想（《易经》,《道德经》,《论语》,《中庸》,《黄帝内经》,《孙子兵法》等），到唯物辩证法的基本原则、基本范畴、特别是以“对立统一”为首的三大基本规律（对立统一规律、质量互变规律、否定之否定规律）[2]，再到当今不断发展的系统理论与系统方法[3-7]，都是明证。系统学既受系统论指导，又在发展中不断丰富系统论内涵，它更重视系统科学普适性规律的深入研究和定量表达。我们所说的系统论固然不是还原论，但也不是整体论，正如钱学森所言，系统论是还原论与整体论的辩证统一[1]。正是这种统一使系统论超越还原论成为可能。但究竟如何

统一？笔者认为，至少可以从三方面的结合来考虑：一是整体指导下的还原与还原基础上的综合相结合（或“自上而下”与“自下而上”方法相结合）；二是机理分析与功能模拟相结合；三是系统认知与系统调控相结合。毫无疑问，还原论是推动人类文明进步的基石（如社会分工、学科分化、结构分层、情况分类等），也是促使系统论产生和发展的基础。

系统学中最简单和基本的原理是系统的结构与环境共同决定系统的功能。当然，系统功能反过来也会影响其结构和环境，它们往往是相互影响的双向关系。系统环境包括自然环境与社会环境，系统结构包括物理结构与信息结构，不同时空尺度和层次结构一般对应不同模式和功能。系统功能一般不能还原为其不同组分自身功能的简单相加，故称之为“涌现（emergence）”，它一般是在时间与空间中演化的。进一步，在给定环境条件下，系统的结构可以唯一决定功能，但反之一般不然。这一基本事实，既造成了根据系统功能来认知其内部（黑箱或灰箱）结构的困难性，也提供了可以选用不同模型结构来表达、模拟或调控系统相同功能的灵活性，这是一种与结构分析法互补的功能建模法。

一般来讲，为了理解系统行为，可通过深化内部结构认知，也可利用外部观测信息，或两者并用；为了提高系统功能，可增强组分的个体功能，也可优化组分的相互关联，或两者并施。特别地，优化组分的相互关联意味着对系统结构进行调整或调控，以使系统达到所期望的整体功能或目的。这往往通过动态调整系统的可控变量或要素，使其自身或其关联“平衡”在一定范围内达到。显而易见，任何调控策略都依赖系统状态、功能和环境，这就需要研究系统的信息、认知、调控与不确定性因素处理等问题。

基于以上分析，笔者认为，系统学应该包括下述“五论”的主要内容：

一是系统方法论　系统学中不同性质的问题所适用的方法论也不同，方法论指导具体研究方法的选用。例如，演绎与归纳、还原与综合、局部与整体、定性与定量、机理与唯象、结构与功能、确定与随机、先验与后验、激励与抑制、理论与应用等相互结合或互补的方法论等，重点是能够超越还原论的方法论；

二是系统演化论　研究在给定环境或宏观约束下，系统层级结构与相应功能在时间和空间中的涌现与演化。特别地，研究系统状态（或性质）在时空中生灭、平衡、稳定、运动、传递、相变、转化、适应、进化、分化与组合、自组织与选择性随机演化等规律，包括各种自组织理论、稳定性与鲁棒性理论、动力系统理论、混沌理论、突变理论、多（自主）体系统、复杂网络、复杂适应系统等；

三是系统认知论　研究系统机理或属性的感知、表征、观测、分类，通信、建模、估计、学习、识别、推理、检测、模拟、预测、判断等智能行为的理论与方法，包括认知科学、建模理论、估计理论、学习理论、通信理论、信息处理、滤波与预测理论、模式识别、自动推理、数据科学与不确定性处理等；

四是系统调控论　研究系统要素的（动态）平衡性与系统结构和功能关系的普适性规律，以及系统的结构调整、机制设计、运筹优化、适应协同、反馈调控、合作与博弈

等，包括优化理论、控制理论与博弈理论等；

五是系统实践论　这是系统学应用于各门具体学科和领域时的相应理论。由于人类任何具体实践活动都属于系统问题，因而离不开系统实践论指导。

需要指出的是，上述“五论”内容是密切关联并相互影响的，只是侧重点不同。

2. 复杂性的挑战

众所周知，中国传统文化中有丰富而又深刻的系统思想，但是与现代科学一样，系统科学并没有诞生在中国。爱因斯坦曾指出，“西方科学的发展是以两个伟大的成就为基础的，那就是：希腊哲学家发明形式逻辑体系（在欧几里得几何学中），以及（在文艺复兴时期）发现通过系统的实验可能找出因果关系”[8]。正是在基于公理的形式逻辑体系和有目的的系统实验基础上，现代科学在还原论思维和追求复杂现象背后的简单规律范式主导下，经过几百年发展取得了辉煌成就，推动了人类文明进程。然而，客观世界在本质上是统一的，描述世界的科学亦应如此。正如著名物理学家普朗克所指出的“科学是内在的整体，它被分解为单独的部门不是取决于事物的本质，而是取决于人类认识能力的局限性。实际上存在着由物理学到化学、通过生物学和人类学到社会科学的连续的链条，这是一个任何一处都不能被打断的链条”[5]。

那么，现代科学知识究竟是如何被获取的？具体科学结论所适用范围的边界又是如何处理的？历史上，关于科学发现的逻辑及其局限性曾被许多著名哲学家和科学家研究过，包括休谟、康德、彭加勒和波普尔等[9-12]。在此，我们回到爱因斯坦提到的西方科学成就的两大基础：逻辑推理和系统实验。事实上，逻辑推理是在“不证自明”的公理假设基础上进行的，而具体数学结论又是在进一步的数学假设条件下推导出来的；人们所进行的有限次（有目的）的系统性实验也往往是在理想环境或给定条件下进行的。这体现了人类理性的认识能力和局限：如果没有具体的假设条件，则很难保证科学结论的普适性和正确性；但如果做了假设和限制条件，则结论就有了边界从而局部化了。

更令人意想不到的是，进入20世纪后，现代科学体系这个复杂适应系统却引出了一系列强烈冲击其主导范式（还原论、确定性与主客体分离）的结论[13]。例如，量子力学中的海森堡测不准原理和量子纠缠神奇的超距作用等，揭示了微观世界的自然规律既无法脱离主体影响也无法通过进一步还原给出确定性答案[14]，数理逻辑中的哥德尔不完备性定理揭示了人类理性推理所依赖的逻辑公理体系存在不确定性[15]，而混沌理论则揭示了宏观世界中哪怕简单的非线性确定性动力系统也会产生不可预测的复杂行为[16]。这说明，现实世界不再被几百年来主导西方科学的“简单性范式”所统治[13]。

进一步，虽然现代科学发展成就辉煌，但无论是已经还原到夸克层次的粒子物理学，还是已经还原到基因层次的分子生物学，对认识或调控宏观层面复杂多样的物质世界和丰富多彩的生命现象，包括大脑意识和重大疾病等，仍难以给出科学解答[17]。当然，可能有人会反问：既然目前科学知识存在还原论所带来的局限性，为什么基于科学知识的工程技术在改造现实世界中能够取得如此巨大的成功？笔者认为，这并非完全是科学知识自身的功劳，工程技术常常超前甚至引领科学发展[18]。实际上，工程技术自身

的创新和应用，除了科学知识成分外，更依赖人的实践经验和创造性智慧将不同技术环节有效连接起来并克服“放大效应”等，最终集成为工程系统所需的整体功能（从科学上讲人的智慧目前还远未被完全认识）。再者，从含有经验成分的工程技术到实际推广应用，往往还要通过多次试验（或仿真）验证，但无论如何，都无法穷尽实际中可能出现的复杂情况和真实环境中的不确定性，尽管系统中的反馈回路可以部分消除不确定性的影响。

此外，如何判断非线性关联系统的稳定性一般是困难的理论问题，除非能验证“小增益定理”[19]或其它稳定性定理的条件。有例子说明，哪怕是两个都稳定的线性子系统，如果连接不当，则关联系统也会变得不稳定[20]；哪怕是小的扰动或偏差，如果负反馈机制失效，系统也可能在正反馈机制推动下走向崩溃。进一步，依靠深度分解与综合集成并在试验和实践中不断演化的人造复杂系统，如互联网、电力系统、交通网络、金融系统、软件系统等，正在变得如此复杂以致超出人类现有知识的理解程度，例如，仅一架波音777客机就有超过300万个部件和15万个子系统[21]。有人甚至预测，人造复杂系统（或人机融合系统）将会有自治力、适应力和创造力，并将摆脱我们的控制[22]。因此，如何真正保证人造复杂系统的安全可靠性，也是科学技术面临的重大挑战之一。

正是在上述大背景下，以“超越还原论”为旗帜的复杂性科学研究在全世界受到空前重视[1，3，4，13，23，24]，这可以看作系统学发展的新阶段。笔者认为，中国传统文化思维与西方近现代文化思维优势的恰当结合，对系统方法论发展具有重要意义，并且复杂性科学有望成为连接自然科学与社会科学的重要桥梁。

3. 复杂性与平衡性

一个自然的问题是，复杂性科学的核心内涵是什么？笔者认为，是关于复杂系统微观关联与宏观功能之间时空演化、预测与调控规律的认识。毫无疑问，复杂性科学是研究系统复杂性的学问，但是迄今对复杂性尚没有统一的具体定义，或许是因为“名可名，非常名”。美国科学家司马贺（Simon H. A.）认为，复杂性研究宜将具有强烈特征的特定种类的复杂系统作为关注重点[25]。笔者认为，复杂性宜借助一个能够“连接”微观关联与宏观功能的基本概念来定义。在系统学众多基本概念中，哪个概念最合适？笔者认为，平衡（balance）概念可担当此任。平衡意味着数量（质量）均等或空间（属性或操作）对称等，它是大自然中“最小能量原理”、“最小作用量原理”、“守恒原理”和“对称性”法则[26，27]的客观反映。在汉语和英语中，“平衡”既是形容词也是动词，因而其内涵具有较强的包容性。此外，为简单起见，本文中平衡的含义也包括动态平衡。

系统中成对（对立、独立或互补）要素之间（张力）的平衡是其秩序之本，而非平衡则是运动变化之源。诚然，系统的平衡或非平衡并不是绝对的，取决于系统的不同时空尺度和研究范围，并且系统在不同层级上的平衡性质亦不相同。进一步，即使对运动或变化现象甚至创新行为，也往往可溯源为某种平衡需求；而对非平衡系统，其演化方向也往往是新的平衡或动态平衡。此外，系统成对要素的平衡（非平衡）程度直接影响

或决定着系统的对称、守恒、秩序、稳定、涌现、突变、生灭、演化、进化、反馈、适应、调控、博弈、竞争、合作、公正等基本性质。可以说，平衡涉及认识世界与改造世界的几乎一切问题，包括人自身的生理与心理问题[28]。因此，平衡概念具有本质性、基础性和普适性。

那么，如何定义复杂性？基于上面的分析，复杂性可以针对系统中要素（属性）的平衡性与系统整体（结构）功能之间的关系来定义。注意在这里的要素平衡性亦包含要素之间相互作用关系的平衡性，并且平衡性是与系统功能联系在一起考虑的。笔者认为，复杂性的进一步定义宜根据人的目的性进行分类。下面讨论三类常见情形：

第一，当我们希望预测系统状态演化时，系统要素的平衡程度往往是预测的重要依据，复杂性可定义为系统状态或行为的不可预测性。预测是决策的基础，尽管我们一般希望提高对系统的预测精度或预测概率，但这除了可能会受人为因素影响外，许多复杂系统还具有样本轨道不可预测的本质属性[29]。例如，真正独立创新的过程既不是完全规划或“路径依赖”的，也不是完全盲目或随机的；许多复杂适应系统（和智能寻优算法），在一定意义下，可以看作由不可预测的“新息”（Innovation）所驱动的“马氏过程”，或是自组织演化与选择性随机的某种结合；有的复杂系统可能高效运行在稳定性边缘或处于“自组织临界”[30]状态。

第二，当我们希望保持系统功能时，注意到系统的稳态功能一般需要系统成对（多对）要素的制约或互补来保障，复杂性可定义为系统的功能关于系统要素平衡程度的灵敏性（脆弱性或非鲁棒性）。系统功能的保持，往往依赖其组织适应能力能否抵消各种退化性或熵增因素影响，例如“环境变化”、“耗散结构”或“边际效应”等；此外，系统功能的保持常常是在系统“否定之否定”的进化中实现的。进一步，系统功能或目标还可能是异质多样与多层次的，底层功能一般是高层功能的基础（如马斯洛的层次理论）。

第三，当我们希望改变系统功能时，现有要素的平衡性需要暂时被打破，复杂性可定义为通过调整系统要素的平衡性而实现系统新功能的困难性。在这种情形下，从控制系统理论角度看，复杂性与系统的能控性或能达性密切相关，当系统具有不确定性时还可能涉及反馈机制最大能力问题[31]。当然，现代控制理论的框架或范式尚需拓广以适用于更为复杂的系统或新的调控模式[32，33]。

如上定义的复杂性有何特色？首先，笔者认为，在系统学里的复杂性不应脱离系统的功能这一重要属性来定义。上述给出的复杂性定义显然与系统功能（或目的）密切关联，这是本文所定义的复杂性与其他复杂性定义（如计算复杂性、描述复杂性、有效复杂性、通讯复杂性等[7，23，34]）的显著不同。其次，复杂性主要研究系统成对要素的平衡性与宏观功能的关系，平衡度的不同将会导致系统宏观功能的不同，或导致系统“稳态（homeostasis）”演化，以及系统旧稳态的打破与新稳态的“涌现”等。因此，这里的复杂性定义还体现了系统学微观与宏观之间的辩证统一和相互影响的特性，从而为避免还原论局限留了空间。

值得指出，系统要素的平衡性必然会涉及成对存在的范畴或概念，如微观与宏观、当前与长远、局部与整体、上层与下层、系统与环境、快变与慢变、量变与质变、秩序与混乱、确定与随机、稳定与发展、开放与保守、原则与妥协、保密与公开、保护与利用、供给与需求、计划与市场、自由与约束、分散与统一、多样与一致、还原与综合、民主与集中、内容与形式、本质与现象、物质与精神、实在与虚在、主体与客体、感性与理性、实践与认识、私利与公益、权力与责任、权利与义务、激励与抑制、竞争与合作、前馈与反馈、正馈与负馈等所包含的成对要素与性质。特别地，系统中成对（或多对）要素的平衡涉及广泛的学科领域，包括政治、经济、社会、文化、法律、科学、工程、生态、环境与管理等，常常是这些领域复杂性问题的核心。

一个自然的问题是，系统要素的平衡是如何实现的？这是复杂性研究的一个关键问题，但具体实现途径往往因系统性质和类型的不同而异。举例来讲，平衡或是在给定环境条件约束下通过系统要素之间的竞争达到（竞争平衡或从竞争到合作平衡），或是在整体目标引导调控、或外部环境影响下系统要素之间适应调整、协同优化或互补共存的结果（适应平衡、协同平衡或互补平衡），或是由系统外部因素的调控作用与系统内部要素的竞争行为所共同决定（调控竞争平衡或纵横双向平衡），或是正反馈激励与负反馈抑制共同作用的结果（正负反馈平衡），或是这些情形的某种组合或混合等。

笔者认为，这里的“要素平衡”不但体现了“阴阳平衡”与“对立统一”的辩证思想，而且适用于“开放系统”和“定性分析”。进一步，“要素平衡”与针对非合作博弈的纳什均衡[35]、研究竞争中协调原理的“介科学”[36]、具有对立互补性的“两重性逻辑”[13]，乃至基于中国传统文化的“度”[37，38]等，都有相通之处。一般来讲，要素的平衡性和系统的稳定性都需要反馈（适应）机制来保障。此外，“要素平衡”往往是建立适当数学模型（或数学方程）而开展定量研究的必要基础，这一研究所涉及的基本数学工具至少包括群论、图论、优化理论、博弈论、变分学、动力系统、数理统计与控制理论等。

4. 系统学的发展基础

一是过去几百年间，各门科学针对客观世界不同时空尺度范围的具体对象进行了大量关于结构与功能关系的研究，用各自学科的基本概念和专门术语积累了丰富知识，使得不同系统之间可以相互借鉴甚至从中提取共性系统学规律[39-41]。实际上，一般系统论[42]、协同学[43]、耗散结构论[44]、突变理论[45]，超循环论[46]、混沌理论[16]、控制论[47，48]、复杂适应系统[49，50]，复杂巨系统的综合集成方法[51，52]等系统学内容就是这样发展过来的。

二是系统论、控制论、信息论、博弈论、计算机、运筹学、统计物理、非线性科学、复杂网络、人工智能、数据处理与科学计算等相关学科的多年发展，也为系统科学发展提供了工具，奠定了良好的基础。特别是，形成了关于系统科学的若干相关分支，以及关于系统稳定性、鲁棒性、适应性、演化、熵增、耗散、信息、建模、反馈、优化、学习、预测、调控、博弈与均衡等一批普适性基本概念、方法和结论[32，33]，这是系

统学未来发展的重要基石。

三是随着当今科学技术的深入发展，复杂性科学的跨学科研究给科学带来的不仅是思维方式的变革[1，4，13]。事实上，当今科学技术的发展前沿已经在时空多尺度多层次上，广泛进入研究复杂性与调控复杂系统的时代[40，41，53]。例如，微观世界调控，量子信息科学，可控自组装[54]，多相反应过程，纳米与超材料，基因调控网络，合成生物学，脑与认知科学，智能网络，智能制造与智能机器人，信息物理系统（CPS），全球化经济，生态与气侯变化等，无一不涉及复杂系统研究，甚至还诞生了众多以“系统”为关键词的新学科，诸如“系统生物学”、“地球系统科学”、“系统法学”[55]等。这些交叉研究领城都需要系统学普适性理论的帮助，因而成为系统学发展的重要驱动力。

5. 系统学的作用

因为系统是任何事物存在的基本方式，系统学的实践涉及人类活动的一切方面：除了上面提到的要面对科学技术中的复杂性挑战之外，还与人生成长、事业发展、生存安全和社会进步等密切相关。因此，系统学亦道亦器、亦体亦用，堪称大用。在生活和工作中，因为忽视系统方法论，我们可能不自觉地陷入“孤立、排他、僵化、片面、表面、单向、线性、非此即彼”等思维局限，很可能进入“盲人摸象、主观武断、刻舟求剑、温水青蛙”式的误区，或导致“顾此失彼、事与愿违、恶性循环、两败俱伤”的局面。从历史上看，人类因不了解或不掌握复杂系统演化与调控规律而遭受过太多挫折甚至灾难，包括自然灾害、战争灾难、流行疾病、社会动荡、政治冲突、金融危机、安全事故、生态恶化、环境污染等。这些问题至今也在严重困扰着人类社会的文明发展。

另一方面，伴随着几千年世界文明发展，人类对社会复杂系统演化与调控规律的探索与实践一刻也没有停止。历史证明，系统学规律和原理的发现与自觉或不自觉运用，对人类文明进步起着巨大作用。下面举几个具体例子。

首先，系统学对人类健康具有重要意义。举例来说，以功能结构模型为基础的传统中医理论体系，包括精气学说、阴阳五行、藏象学说、经络学说、体质学说、病因病机、辨证施治、三因制宜等，所蕴含的整体思维、辩证思维、唯象思维与功能建模等方法，具有朴素的系统演化论、认知论和调控论思想，其中“阴阳平衡”是理解生理功能、阐释病理变化和指导疾病诊治的核心原则[56-58]。毋庸置疑，中医药为几千年来中华民族的生命延续与抗击疾病做出了不可磨灭的贡献，其朴素的系统方法论避免了还原论局限，但其研究需要实现现代化，而在这一过程中，系统学可望发挥重要作用[1，57，59]。

其次，人的性格特征中“要素平衡”对创新能力具有重要意义。美国心理学家契克森米哈赖（Csikszentmihalyi M.）曾经归纳出创新型人物的主要性格特征，表述为如下“十项复合体”[60]：活力与沉静；聪明与天真；责任与自在；幻想与现实；内向与外向；谦卑与自豪；阳刚与阴柔；叛逆与传统；热情与客观；痛苦与享受。他认为，以上这些明显相对的特质通常同时呈现在创造型人物身上，而且以辩证的张力相互整合；具有上述复合性格的人，有能力表现出人性中所有潜在的特质，而如果只偏向某一端，则这些特质就萎缩了。显然，这对高层次创新型人才培养具有启发意义。当然，真正取得

创新性成就，还需要其他因素配合，包括学术环境、知识积累、时代机遇，同行承认、后人继承和普及推广等，这也是系统性问题。

再者，系统学中“反馈平衡”原理在生产力发展中具有普遍重要性。1776年，英国詹姆斯・瓦特（James Watt，1736-1819）制造出第一台可以普遍应用的蒸汽机，其核心技术是具有负反馈机制的“离心式调速器”，它可以自动调节阀门以平衡负载变化对速度的影响，成为英国工业革命的象征，当今几乎所有工程技术系统都离不开反馈技术。无独有偶，同样是在1776年的英国，亚当・斯密（Adam Smith，1723-1790）首次发表了《国家财富的性质和原因的研究》（简称《国富论》）[61]，书中所论述的那只在暗中推动市场经济行为的“看不见的手”，其工作原理也是（分布式）负反馈机制，它通过价格波动自动调节市场上商品的种类与数量以达到供需平衡，这一原理至今仍在深刻影响着全世界经济发展。不仅如此，“反馈平衡”作为有效克服不确定性并实现系统目标的关键机制，实际上在动物（包括人）和机器中几乎无处不在[47]，反馈控制也被认为是第一个系统学科[48]。

下面，我们来看系统方法论在社会复杂系统发展中的重要作用。

19世纪，马克思和恩格斯在黑格尔和费尔巴哈等西方传统哲学基础上创立了唯物辩证法，他们在社会和自然系统研究中大量运用了系统思想和方法，揭示了生产力与生产关系的矛盾运动是人类社会发展的基本规律。特别地，马克思的《资本论》[62]研究了资本主义体系内在逻辑矛盾和发展规律，恩格斯的《自然辩证法》[63]为系统论发展奠定了基础。可以说，马克思和恩格斯都是系统科学的先驱[2]。近百年来，在马克思主义理论指导和共产党领导下，中国发生了翻天覆地的变化，尤其是改革开放36年来创造了震惊世界的发展奇迹。中国为什么能够如此？有什么宝贵经验？这是国内外许多人关注的重大问题。实际上，无论是“改革开放”基本国策，还是“四个全面”战略布局，都是关于中国社会复杂系统的结构、环境与功能的调控。根据系统学结构与环境决定系统功能的基本原理，对于不同社会结构和不同社会环境，实现社会不同发展阶段功能的调控手段和路径也不会完全一致。我国领导人曾将发展经验概括为坚持“十个结合”[64]，其中涉及到原理与适应、坚守与改革、活力与统一、物质与精神、效率与公平、系统与环境、发展与稳定等多对要素的协调平衡。

我国当前进行的全面深化改革，也是“复杂的系统工程”[65]。特别地，经济、政治、文化、社会和生态这五大子系统“五位一体”的总体发展布局，就是关于“系统中的系统”协调与平衡调控问题。这五大子系统相互耦合、相互作用、具有多层级结构和复杂因果循环反馈回路，如果他们长期处于非平衡畸形发展状态或其中的组织调控功能出现异化，则必然导致严重问题[1，66，67]。进一步，这五大子系统中几乎所有改革问题也都涉及系统学问题。比如，改革发展与稳定的有机统一涉及平衡与非平衡关系问题；市场配置资源与政府发挥作用的关系涉及分布式适应优化与集中式反馈调控问题；效率与公平问题涉及微观与宏观层面正反馈与负反馈机制的平衡。又比如，推动人民代表大会制度与时俱进涉及政治体系的包容性、适应性与平衡性问题，既要吸收和借鉴人类政治

文明有益成果，又要避免其他国家政治制度的缺陷[68–71]；既要通过法律这个“控制器”调整平衡各种利益关系[72–74]，又要加强对权力运行的制约和监督并把其关进制度的笼子里[65, 75]。再比如，生态文明建设是其他四个系统建设的基础，而生态系统的平衡[76]及其动力学演化[77]，也是系统学研究问题。

最后，值得提及的是，我国各级领导常把国家与社会治理中的困难问题归纳为“复杂的系统工程”，说明需要从系统的角度来思考并解决。这不能不使人想起钱学森等老一辈科学家在全国大力推动并普及系统工程与系统科学所产生的广泛影响[78]，以及他在晚年为创建系统学所付出的巨大努力[1, 51, 52]。

致谢 笔者诚挚感谢于景元教授关于系统学体系的宝贵建议、李静海院士关于介科学的交流讨论、以及车宏安、狄增如、韩靖、程代展、高小山、张纪峰、王红卫、杨晓光、洪奕光、姜钟平、张启明、黄一、方海涛、齐波、丁松园等教授和学者的许多有益建议和热情鼓励。

参考文献

[1] 钱学森. 创建系统学. 上海交通大学出版社，2007.
[2] 王伟光（主编）. 照辩证法办事. 人民出版社，2014.
[3] 尼科利斯 G，普利高津 I. 探索复杂性. 四川教育出版社（罗久里、陈奎宁译），1986.
[4] 沃尔德罗普 M. 复杂——诞生于秩序与混沌边缘的科学. 三联书店（陈玲译），1995.
[5] 许国志，顾基发，车宏安等. 系统科学. 上海科技教育出社，2000.
[6] 高隆昌. 系统学原理. 科学出版社，2005.
[7] 米歇尔 M. 复杂. 湖南科学技术出版社（唐璐译），2011.
[8] 《爱因斯坦文集》，第一卷，第574页，商务印书馆（徐良英等编译），1994.
[9] 休谟 D. 人性论（一、二）. 商务印书馆，1980.
[10] 康德 E. 纯粹理性批判. 华中师范大学出版社（韦卓民译），2000.
[11] 彭加勒 H. 科学与假说. 商务印书馆（李醒民译），2006.
[12] 波普尔 K. 科学发现的逻辑. 中国美术学院出版社（查汝强等译），2010.
[13] 莫兰 E. 复杂性思想导论. 华东师范大学出版社（陈一壮译），2008.
[14] 海森堡 W. 物理学和哲学. 商务印书馆（范岱年译），1999.
[15] 克莱因 M. 数学：确定性的丧失. 湖南科学技术出版社（李宏魁译），1997.
[16] Lorenz E N. The Essence of Chaos. University of Washington Press，1993.
[17] 罗思曼 S. 还原论的局限：来自活细胞的训诫. 上海世纪出版集团（李创同、王策译），2006.
[18] 阿瑟 W. 技术的本质. 浙江人民出版社（曹东溟、王健译），2014.
[19] Jiang Z P，Teel A R，Praly L. Small gain theorem for ISS systems and applications. Mathematics of Control，Signals and Systems，1994，7：95–120.
[20] 郭雷. 时变随机系统：稳定性、估计与控制. 吉林科学技术出版社，1993.
[21] Astrom K J，et al（Eds.）. Control of Complex Systems. Springer，2001.
[22] 凯利 K. 失控：全人类的最终命运和结局. 新星出版社（东西文库译），2010.

[23] 盖尔曼 M. 夸克与美洲豹：简单性和复杂性的奇遇. 湖南科学技术出版社（杨建邺等译），1998.
[24] 宋犖. 还原论和系统论. 系统与控制纵横，2015，2（1）：65–69.
[25] 司马贺 H A. 人工科学：复杂性面面观. 上海科技教育出版社（武夷山译），2004.
[26] 李政道. 对称与不对称. 清华大学出版社，2000.
[27] Mainzer K. Symmetry and Complexity：The Spirit and Beauty of Nonlinear Science. World Scientific Publishing Co.Pte.Ltd，2005.
[28] Heider F. The Psychology of Interpersonal Relations. Lawrence Erlbaum Associates，1958.
[29] 西尔弗 N. 信号与噪声. 中信出版社（胡晓姣等译），2013.
[30] 巴克 P. 大自然如何工作：有关自组织临界性的科学. 华中师范大学出版社（李炜、蔡勖译），2001.
[31] 郭雷. How much uncertainty can the feedback mechanism deal with?. Plenary Lecture at the 19th IFAC World Congress，August 24–29，2014，Cape Town，South Africa.
[32] Samad T，Baillieul J（Eds.）. Encyclopedia of Systems and Control. Springer，2015.
[33] 郭雷，程代展，冯德兴等. 控制理论导论：从基本概念到研究前沿.科学出版社，2005.
[34] Wegener I. Complexity Theory. Springer，2005.
[35] 齐格弗里德 T. 纳什均衡与博弈论. 化学工业出版社（洪雷，陈玮，彭工译），2013.
[36] 李静海，黄文来.探索介科学. 科学出版社，2014.
[37] 李泽厚. 哲学纲要. 北京大学出版社，2011.
[38] 度知，度学. 经济科学出版社，2007.
[39] 欧阳莹之. 复杂系统理论基础. 上海科技教育出版社（田宝国等译），2002.
[40] Meyers R A（Ed.）. Encyclopedia of Complexity and Systems Science. Springer，2009.
[41] 李静海. Mesoscales：The path to transdisciplinarity. Chemical Engineering Journal，2015，277：112–115.
[42] 贝塔朗菲 冯.一般系统论：基础、发展和应用. 清华大学出版社（林康义，魏宏森译），1987.
[43] 哈肯 H.协同学引论. 原子能出版社（徐锡申等译），1984.
[44] 尼克利斯 G， 普利高津 I. 非平衡系统的自组织. 科学出版社（徐锡申等译），1986.
[45] 托姆 R. 构稳定性与形态发生学. 四川教育出版社（赵松年等译），1992.
[46] 艾根 M，舒斯特尔 P. 超循环论. 上海译文出版社（曾国平，沈小峰译），1990.
[47] 维纳 N. 控制论. 科学出版社（郝季仁译），1963.
[48] Astrom K J，Kumar P R. Control：A perspective. Automatica，2014，50：3–43.
[49] 霍兰 J H. 适应性造就复杂性. 上海科技教育出版社（周晓牧，韩晖译），2000.
[50] 霍兰 J H. 自然与人工系统中的适应：理论分析及其在生物、控制和人工智能中的应用. 高等教育出版社（张江译），2008.
[51] 钱学森，于景元，戴汝为. 一个科学新领域：开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志，1990，3.
[52] 于景元. 钱学森与系统科学. 系统与控制纵横，2015，2(1)：11–22.
[53] 周光召. 复杂适应系统和社会发展. 中国系统工程学会第12届学术年会会议材料（车宏安整理），2002年11月，昆明.
[54] 王宇，林海昕，丁松园等. 关于可控组装的一些思考（一）：从催化到催组装. 中国科学：化学，2012，42（4）.

[55] 熊继宁，系统法学导论. 知识产权出版社，2006.
[56] 李德新，刘燕池. 中医基础理论. 人民卫生出版社，2011.
[57] 谢新才，孙悦. 中医基础理论解析. 中国中医药出版社，2015.
[58] 毛嘉陵（主编）. 走进中医. 中国中医药出版社，2013.
[59] 张启明. 数理中医学导论. 中医古籍出版社，2011.
[60] 契克森米哈赖 M. 创造力. 时报出版公司（杜明诚译），1999.
[61] 斯密 A. 国富论. 陕西师范大学出版社，陈星译，2006.
[62] 马克思 K. 资本论. 人民出版社（郭大力，王亚南译），1975.
[63] 《马克思恩格斯全集》第二十卷. 人民出版社，1971.
[64] 胡锦涛. 在纪念党的十一届三中全会召开30周年大会上的讲话. 人民出版社，2008.
[65] 习近平. 谈治国理政. 外文出版社，2014.
[66] 许倬云. 说中国：一个不断变化的复杂共同体. 广西师范大学出版社，2015.
[67] 金观涛. 历史的巨镜. 法律出版社，2015.
[68] 福山 F. 政治秩序与政治衰败：从工业革命到民主全球化. 广西师范大学出版社（毛俊杰译），2015.
[69] 本书编写组. 西式民主怎么了. 学习出版社，2014.
[70] 阿西莫格鲁 D， 罗宾逊 J A. 国家为什么会失败. 湖南科学技术出版社（李增刚译），2015.
[71] 哈伯德 G，凯恩T. 平衡：从古罗马到今日美国的大国兴衰. 中信出版社（陈毅平译），2015.
[72] 庞德 R. 通过法律的社会控制. 商务出版社（沈宗灵译），2013.
[73] 维纳 N. 人有人的用处. 商务印书馆（陈步译），2014.
[74] 张文显（主编）. 法理学. 法律出版社，2013.
[75] 孟德斯鸠 C. 论法的精神. 商务印书馆（许明龙译），2014.
[76] 戈尔 A. 濒临失衡的地球：生态与人类精神. 中央编译出版社（陈嘉映等译），2012.
[77] Levin S. Fragile and Dominion：Complexity and the Commons. Perseus Publishing，1999.
[78] 钱学森，许国志，王寿云. 组织管理的技术——系统工程. 文汇报，1978.

本文原载于《系统科学与数学》2016年第3期

【作者简介】郭雷，1982年毕业于山东大学数学系，1987年在中科院系统科学研究所获博士学位。曾任中国科学院数学与系统科学研究院院长，现任中科院国家数学与交叉科学中心主任。主要从事自适应控制，系统辨识，自适应信号处理，反馈机制能力，多自主体系统，博弈控制系统，量子控制系统等研究。先后当选为IEEE Fellow，中国科学院院士，第三世界科学院院士，IFAC Fellow，瑞典皇家工程科学院外籍院士等。曾任或现任国务院学位委员会委员，国际自动控制联合会奖励委员会委员，IEEE控制系统奖励委员会委员，国家科学技术奖励委员会委员，国家973计划专家顾问组成员，中国工业与应用数学会理事长，中国科学院学术委员会副主任，上海系统科学研究院院长等。